

Г. В. Шимов

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург
g.v.shimov@urfu.ru

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРУБАХ

В работе рассказано о методике травли поверхностного слоя металла с труб и измерении упругой релаксации для анализа остаточных напряжений в холоднокатаных нержавеющей трубах. Приведены результаты экспериментального определения остаточных напряжений в трубах из стали 08Х18Н10Т.

Ключевые слова: остаточные напряжения, экспериментальное исследование, холоднокатаные трубы.

G. V. Shimov

EXPERIMENT ON DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN PIPES

The paper describes the method of etching the surface layer of metal from the pipes and the measurement of elastic relaxation for the analysis of residual stresses in cold-rolled stainless steel pipes. The results of the experimental determination of residual stresses in the pipes of steel 08H18N10T are given.

Key words: residual stresses, experimental research, cold-rolled tubes.

Практически всеми «новыми» методами неразрушающего контроля остаточных напряжений в металлопродукции, такими как рентгеновские, ультразвуковые, оптические, магнитные и др., измеряют остаточные напряжения между атомами кристаллической решетки металла. Вместе с тем остаточные напряжения 2 рода (межзеренные и субзеренные напряжения) и 3 рода (макронапряжения, уравновешенные в объеме всего тела) практически не могут быть зафиксированы способами неразрушающего контроля [1]. Наиболее распространенными среди методов разрушающего контроля остаточных напряжений являются способы механического расчленения, например, методы сверления, разрезки (полос либо колец) и послойной разрезки. Суть этих спо-

сбатов — косвенное определение остаточных напряжений по результатам фиксации упругой реакции тела на внешнее механическое воздействие.

Для фиксации остаточных напряжений 3 рода в трубах применяется метод разрезки колец. Суть метода заключается в отрезке от трубы тонкого кольца, разрезке его по образующей и последующей фиксации упругого сжатия или раскрытия кольца в месте реза. Этим способом определяют тангенциальные остаточные напряжения в трубе. Недостатки этого способа очевидны и давно известны. Дело в том, что в момент отрезки кольца поле остаточных напряжений неизбежно меняется (в том числе и тангенциальных) и в реальности измеряются остаточные напряжения в отдельно взятом кольце, которые могут не иметь ничего общего с напряжениями в исходной трубе.

Вышеуказанных недостатков лишен предлагаемый в работе метод травливания. Метод заключается в снятии тонкого поверхностного слоя металла электролитическим травлением и последующей фиксации упругих изменений геометрических размеров тела. Метод может быть применен как в предлагаемом в работе формате полного травливания поверхностного слоя с трубы, так и в формате локального травления какой-либо области тела и фиксации упругих реакций посредством тензодатчиков, аналогично методу сверления. Как ни странно, в зарубежной литературе полностью отсутствует описание каких бы то ни было попыток применения травления для оценки остаточных напряжений в металлопродукции. В практике испытания металлов травление присутствует только как способ очистки поверхности перед применением некоторых неразрушающих методов контроля, а также как инструмент для качественной оценки наличия или отсутствия остаточных напряжений в таких методиках, как АМ и АМУ (ГОСТ 6032—89). Вместе с тем правильное применение метода травливания может обеспечить не только высокую точность определения остаточных напряжений, но и высокую скорость испытаний. Снятие поверхностного слоя металла способом травления не приводит к локальным скачкам температуры, не вызывает эффектов локальной вибрации или деформации, что обеспечивает точность фиксации упругих реакций тела.

Проектирование установки

В разрабатываемой методике определения остаточных напряжений метод травления применяется для измерения продольных остаточных напряжений в поверхностных слоях труб. Трубы для атомной энергетики, на которых проводились эксперименты, были выбраны в качестве объекта исследования по нескольким причинам. Во-первых,

труба является идеальным геометрическим объектом для фиксации упругих разгрузок и остаточных напряжений 3 рода. Во-вторых, трубы для АЭС (в данном случае трубы из стали 08X18H10T размерами 16×1,5 мм) практически идеально прямые, что гарантирует точность измерения линейного удлинения. В-третьих, не смотря на то, что требования к остаточным напряжениям на эту продукцию не прописаны практически ни в одном стандарте, на эту проблему в последнее время обращают внимание. Дело в том, что при эксплуатации в агрессивной среде растягивающие остаточные напряжения на поверхности труб приводят к быстрому раскрытию коррозионных язв и трещин и выходу трубной арматуры из строя вследствие коррозионного растрескивания.

В работе [2] описана расчетная методика определения остаточных напряжений, основанная на «энергетическом подходе» [3], которая, также как и метод разрезки колец, основана на методе расчленения, но предполагает применение метода стравливания поверхностного слоя с трубы. После снятия поверхностного слоя и фиксации упругой релаксации по длине рассчитываются остаточные напряжения по всему сечению стенки трубы.

Для практической реализации и апробации предложенной в работе [2] методики необходимо разработать конструкцию установки для стравливания тонкого поверхностного слоя с трубы. Установка, предназначенная для проведения экспериментов по измерению продольных остаточных напряжений, должна обеспечивать высокую равномерность стравливания поверхностного слоя, иметь удобную процедуру заливки и слива электролита, а также она должна обеспечивать быструю и удобную установку и снятие образца. Кроме того, установка должна обеспечивать безопасность работы для оператора и окружающих, поэтому конструкция должна быть устойчивой с целью не допустить опрокидывания ванны с электролитом. Одной из проблем реализации способа является то, что в процессе травления продукты реакции неравномерно отводятся от поверхности. В верхней части образующиеся пузырьки беспрепятственно всплывают в электролите, а в нижней части образца образуется слой «прилипания» пузырьков, который нарушает нормальную кинетику процесса.

При проектировании конструкции установки для решения вышеуказанных проблем было применено непрерывное вращение образца в процессе травления в ванне с электролитом. Сложность конструктивных решений подвода крутящего момента к образцу обуславливается агрессивностью среды травления, а также необходимостью непрерывного подведения тока к образцу. Единственным возможным вариантом

конструкции установки является подвод крутящего момента к образцу через гибкий привод вращения, при этом подведение тока можно реализовать через подшипник качения, установленный непосредственно на образце.

Методика измерения

Методика измерения остаточных напряжений заключается в следующем:

- 1) измерение начальных размеров образца: исходная длина образца L_0 , исходный наружный диаметр D_0 , исходная толщина стенки S_0 ;
- 2) травливание тонкого поверхностного слоя с наружной либо внутренней поверхности образца на установке;
- 3) измерение конечных размеров образца: конечная длина образца L_1 , конечный наружный диаметр D_1 , конечная толщина стенки S_1 .

После измерения производится расчет распределения остаточных напряжений в стенке трубы или в сечении прутка по специально разработанной расчетной методике [2].

Стенд для измерения длины образца представляет собой жесткую металлическую раму, выполненную из толстого металлопрофиля с неподвижной и подвижной траверсой. В подвижной траверсе смонтирована измерительная головка. Внешний вид измерительного стенда приведен на рис. 1.

Перед началом эксперимента производится изменение исходной длины образца. Для этого образец устанавливается в держатели, закрепленные на неподвижной 8 и подвижной 3 траверсах стенда. Подвижная траверса 3 по направляющей 2 прижимается вплотную к образцу. После этого подвижная контрольная стойка с индикатором подводится к подвижной траверсе и фиксируется винтом 5. Фиксацию контрольной стойки необходимо осуществить в положении, при котором индикатор 6 показывает значение 0,5...1,0 мм, в этом случае индикатор сможет фиксировать как удлинение образца после травления, так и его укорочение.

Для повышения точности измерения длины должны проводиться в нескольких положениях образца с вращением на угол $\alpha = 45^\circ$ (всего 4 положения), после чего можно рассчитать среднее значение абсолютного изменения длины образца:

$$\Delta L_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n (L_{cp0i} - L_{cpli})}{n}, \quad (1)$$

где $L_{cр0i}$ — длина образца до травления в положении i , $L_{cр1i}$ — длина образца после травления в положении i , n — количество положений образца ($n = 4$), в которых проводили измерение длины (рис. 2, *а*). Это позволит исключить возможное влияние на точность измерения общей кривизны образца, а также локального ее прогиба при расположении на стенде измерения. Риски с номерами сечений наносятся лезвием на поверхности торцевых заглушек, чтобы они не стерлись в процессе травления (рис. 2, *б*).

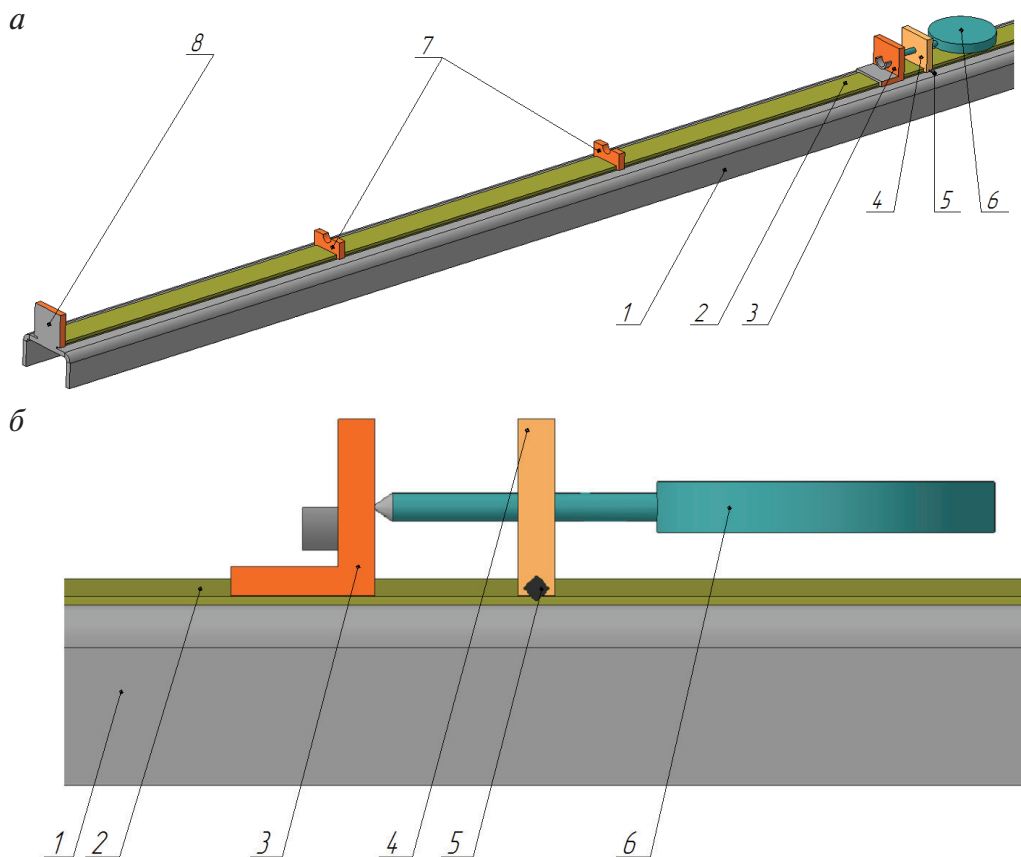


Рис. 1. Внешний вид измерительного стенда:

а — вид стенда в 3D; *б* — вид узла измерения сбоку; 1 — жесткая рама; 2 — направляющая планка; 3 — подвижная траверса; 4 — подвижная контрольная стойка; 5 — фиксирующий винт контрольной стойки; 6 — индикатор многооборотный; 7 — поддерживающие промежуточные стойки; 8 — неподвижная траверса

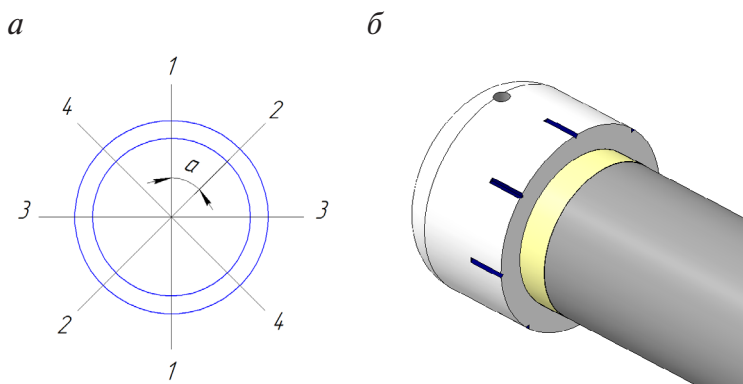


Рис. 2. Положения образца, в которых производятся измерения диаметра и длины до и после стравливания слоя металла:

a — номера (*i*) сечений; *б* — метки, нанесенные на торцевую заглушку образца

Важным моментом методики измерения является подготовка образцов труб или прутков для эксперимента. Длина образца должна быть не слишком маленькая с целью повышения точности измерения упругой деформации образца после травления. Опытным путем было установлено, что оптимальной длиной образца при стравливании поверхностного слоя толщиной 0,05...0,08 мм может быть длина $L = 1500$ мм. Торцы образцов должны быть надежно изолированы для предотвращения попадания на них кислоты. Также на образце должна быть четко выделена рабочая длина поверхности травления. В случае стравливания наружного поверхностного слоя изоляция образца осуществляется в соответствии с рис. 3, *a*. При этом проводится дополнительная изоляция торцов с помощью жидкого расплавленного капрона или лака, а также выделения длины поверхности травления на наружной поверхности. В случае стравливания внутреннего поверхностного слоя изоляция образца трубы осуществляется в соответствии с рис. 3, *б*. При такой схеме изоляции электролит беспрепятственно должен попадать внутрь образца, а вся наружная поверхность должна быть изолирована с целью не допущения попадания на нее кислоты в процессе эксперимента.

Процесс подготовки образца осуществляется в следующей последовательности:

- 1) отрезка от трубы или прутка образца мерной длины;
- 2) крепление подшипника по центру образца;
- 3) нанесение слоя капрона или лака на наружную/внутреннюю поверхность с целью изоляции торцов образца и установления фиксированной длины поверхности травления;

- 4) изоляция наружной поверхности образца (в случае травления внутренней поверхности) с помощью капрона или лака;
- 5) установка торцевых заглушек;
- 6) крепление торцевых заглушек при помощи зажимных винтов;
- 7) крепление приводящих валов при помощи шпилек.

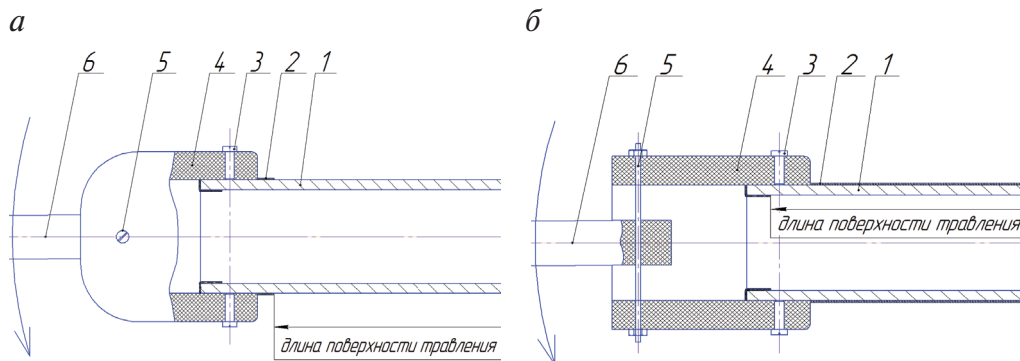


Рис. 3. Схема изоляции торца образца при травлении наружного поверхностного слоя (а) и внутреннего (б):

1 — образец; 2 — изоляция (лак/капрон); 3 — зажимной винт; 4 — торцевая заглушка; 5 — шпилька; 6 — приводящий вал

Изоляцию торцов удобнее всего осуществлять посредством опускания образца в вертикальном положении в емкость с подготовленной изолирующей жидкостью (капрон/лак). В этом случае легко обеспечить точность нанесения изоляции, контролируя уровень изолятора в емкости.

Изоляцию наружной поверхности можно проводить двумя способами. Первым способом является нанесение тонкого слоя изолятора (капрона, лака) по аналогии с изоляцией торцов образца. Однако этот способ сложен и не гарантирует стопроцентной изоляции. Вторым способом является установка наружного защитного кожуха по принципу «труба в трубе». В качестве такого кожуха может применяться полипропиленовая труба, внутренний диаметр которой чуть больше наружного диаметра образца. При реализации второго способа изоляции наружной поверхности необходимо не допустить попадание электролита в зазор между образцом и защитным кожухом. После подготовки образца он вместе с закрепленными гибкими валами опускается в электролит и закрепляется в фиксаторах установки. После этого на подшипник и ванну крепятся контакты от источника тока, ванна заполняется электролитом до полного погружения образца и один из гибких валов крепится в зажимах двигателя вращения. В таком состоянии установ-

ка готова к работе (рис. 4). В качестве электролита использовался раствор кислот, содержащий H_3PO_4 — 86 %, Cr_2O_3 — 12 % (в граммах) и H_2SO_4 — 2 %. В экспериментах использовался выпрямитель электрического тока, позволяющий регулировать как выходной ток, так и напряжение во время работы.

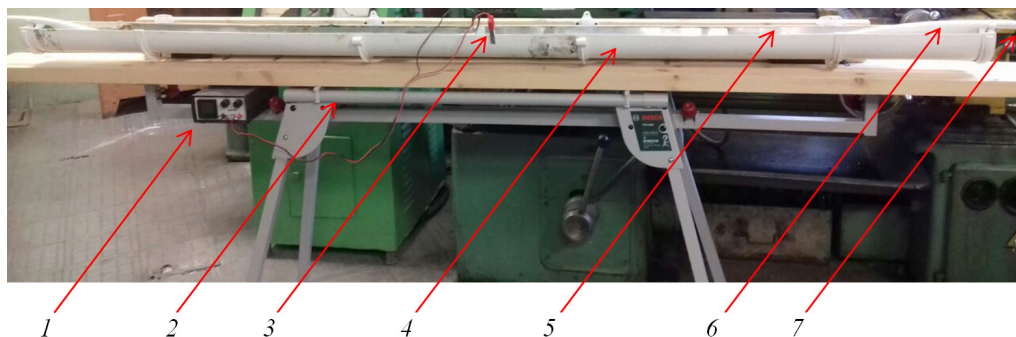


Рис. 4. Внешний вид ванны в момент работы установки:

1 — источник тока; 2 — станина; 3 — контакты; 4 — ванна; 5 — стальная лента; 6 — гибкий привод; 7 — вал, ведущий к двигателю

Работа установки начинается с включения привода вращения. При этом необходимо убедиться, что образец вращается ровно по отношению к оси установки, нет сильных биений, нет утечек или брызг электролита. Если все элементы конструкции работают корректно, то на подшипник и ванну устанавливаются зажимы с проводами, ведущими к источнику тока, засекается время травления и подается напряжение. Перед включением источника тока на нем выставляются требуемые значения напряжения и силы тока. После запуска установки по всей поверхности образца начинается проходить электрохимическая реакция травления, что можно зафиксировать визуально: вдоль всей длины образца происходит образование продуктов реакции, газообразование и бурление.

После окончания расчетного времени травления выключается источник тока, от подшипника и ванны отсоединяются контакты с проводами, от гибкого привода вращения отсоединяется двигатель и образец вместе с гибким приводом извлекается из установки. Затем необходимо обмыть образец и просушить. После просушки от образца отсоединяются гибкие приводы, снимаются торцевые заглушки, подшипник и слой изолятора с торцов образца. После проведения травления образец аналогичным образом размещается на измерительном стенде, после чего фиксируется его длина и рассчитывается абсолютное удлинение или укорочение $\Delta L_{\text{ср}}$ по формуле (1).

Эксперимент и обсуждение результатов

На первом этапе проведения эксперимента необходимо было установить толщину травливаемого слоя, достаточную для фиксации упругой разгрузки по длине ΔL . Для этого было проведено травление с наружной поверхности двух образцов на глубину 0,03 и 0,06 мм соответственно. Абсолютное изменение длины образцов, измеренное по описанной выше методике, составило $\Delta L_{\text{ср1}} = 0,04$ мм и $\Delta L_{\text{ср2}} = 0,11$ мм. Таким образом, было принято решение, что толщина травливаемого слоя должна составлять примерно 0,06 мм. Положительное значение (абсолютное удлинение) образца объясняется наличием на наружной поверхности растягивающих остаточных напряжений. Остаточные напряжения в металле реактивны по своей природе и по сути являются упругой реакцией металла на «активную нагрузку». Поэтому снятие тонкого поверхностного слоя металла с растягивающими остаточными напряжениями равносильно снятию некоторой сжимающей внешней нагрузки с образца, т. е. если на поверхности образца присутствуют сжимающие остаточные напряжения, то образец после травления укорачивается и $\Delta L_{\text{ср}} > 0$, и наоборот, если на поверхности образца присутствуют растягивающие остаточные напряжения, то образец после травления удлиняется и $\Delta L_{\text{ср}} < 0$.

В основном эксперименте учувствовало 18 образцов, отрезанных от труб размером $16 \times 1,5$ мм из стали 08X18H10T. 11 образцов были подготовлены для травления наружной поверхности, 7 — для травления внутренней поверхности (рис. 5). Режимы травления, а также результаты измерения релаксации образцов приведены в табл. 1.



Рис. 5. Образцы для проведения эксперимента:

a — для травления наружной поверхности,
б — для травления внутренней поверхности

Таблица 1

Режимы травления и результаты измерения релаксации

№	L_{cp0} , мм	d_0 , мм	t , мин	L_{cp1} , мм	d_1 , мм	ΔL_{cp} , мм	I , А	Прим.	σ_{zz} , МПа	$\sigma_{\phi\phi}$, МПа
Травление наружной поверхности										
1	1480,10	16,011	100	1480,19	15,881	0,09	2		119,37	397,91
2	1482,30	16,008	100	1482,38	15,878	0,08	2		105,73	352,44
3	1483,80	16,007	100	1483,91	15,824	0,11	2		108,56	361,85
4	1480,60	16,012	120	1480,74	15,805	0,14	2		117,67	392,22
5	1481,60	15,995	120	1481,81	15,787	0,24	2	выб.	130,11	433,71
6	1480,40	16,011	120	1480,52	15,855	0,12	2		118,95	396,50
7	1480,90	16,022	90	1480,98	15,905	0,08	2		103,32	344,41
8	1479,50	16,000	90	1479,57	15,883	0,07	2		122,26	407,52
9	1480,50	16,050	90	1480,620	15,927	0,12	2		135,79	452,63
10	1481,50	15,990	180	1481,730	15,730	0,23	2		114,44	381,47
11	1480,50	16,015	180	1480,735	15,755	0,19	2		119,37	397,91
Травление внутренней поверхности										
12	1476,00	14,520	100	1475,87	14,650	0,13	2		-119,35	-397,84
13к	1464,00	14,500	100	1463,86	14,630	0,14	2	коротк.	-131,68	-438,94
14	1475,00	14,525	100	1474,90	14,681	0,10	2		-117,84	-392,80
15	1476,00	14,450	90	1475,92	14,580	0,08	2		-121,97	-406,56
16	1477,00	14,500	90	1476,99	14,617	0,01	2	выб.	-134,28	-437,18
17	1465,50	14,480	180	1465,33	14,714	0,17	2		-125,93	-419,76
18	1478,50	14,520	180	1478,33	14,754	0,17	2		-119,35	-397,84

После анализа результатов на резко выделяющиеся значения (методом отсева грубых погрешностей по максимальному относительному отклонению) были исключены из анализа образцы № 5 и 16. При этом образец № 13 (короткий) в анализ прошел. В результате анализа проведенных измерений выявлена хорошая повторяемость результатов измерения абсолютного изменения длины образцов, что может говорить о правильной подготовке образцов и корректности метода измерения длины. После измерения упругой релаксации образцов были рассчитаны продольные остаточные напряжения на поверхности труб и распределения остаточных напряжений в стенке [2]. Результаты расчетов остаточных напряжений приведены в табл. 1. На графиках для примера приведены распределения продольных, тангенциальных и радиальных остаточных напряжений по толщине стенки трубы для образца № 1 (рис. 6).

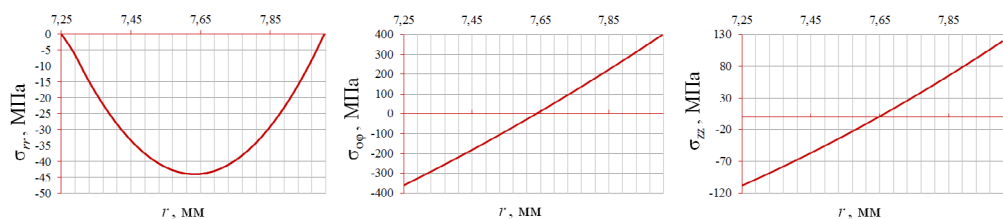


Рис. 6. Распределения остаточных напряжений по толщине стенки трубы (образец № 1)

В результате анализа проведенных измерений можно сделать вывод, что на поверхности труб присутствуют значительные растягивающие остаточные напряжения, что обусловлено технологией их производства. Для всех образцов, кроме образцов № 5 и 16, продольные остаточные напряжения на наружной поверхности укладываются в диапазон от 100 до 155 МПа, а на внутренней поверхности — от 90 до 135 МПа. Тангенциальные остаточные напряжения на наружной поверхности укладываются в диапазон от 340 до 495 МПа, а на внутренней поверхности — от 315 до 440 МПа. Учитывая тот факт, что расчетная методика очень чувствительна к точности измерения длины трубы, диапазоны полученных напряжений не слишком велики. Таким образом, можно сделать вывод о корректности применения нового способа и расчетной методики определения остаточных напряжений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 17-79-100072).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Соколов И. А., Уральский В. И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М. : Металлургия, 1981. 96 с.
- 2 Shimov G. V. Rapid Method for Determining the Distribution of Residual Stresses in Pipes // Materials Performance and Characterization. Vol. 4. № 7. 2018.
- 3 Колмогоров Г. Л., Кузнецова Е. В., Тиунов В. В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. 226 с.